

# 新型复合左右手传输线及其在滤波器设计中的应用\*

李天鹏<sup>†</sup> 王光明 梁建刚 张晨新

(空军工程大学导弹学院, 三原 713800)

(2012年1月10日收到; 2012年4月9日收到修改稿)

开环谐振器阵列由于结构庞大, 难以实现小型化, 而逆开环谐振器则由于刻蚀在接地板上, 容易对微波电路中其他部件造成干扰. 针对上述问题, 提出了一种新型双层介质复合左右手传输线结构, 并提取了其等效相对介电常数和等效相对磁导率, 然后分析了新结构的尺寸参数对其传输特性的影响程度, 最后将一种新型 Minkowski 分形曲线应用于该结构, 设计和制作了两款双频滤波器, 验证了该复合左右手传输线的双频特性.

**关键词:** 复合左右手传输线, Minkowski 分形曲线, 双频滤波器

**PACS:** 42.25.Bs, 78.70.-g

## 1 引言

自 Pendry 于 1996 年和 1999 年分别用细金属导线 (rod) 阵列构造出了低频等效负介电常数的人工媒质<sup>[1]</sup>和用开环谐振器 (split-ring resonator, SRR) 阵列构造出了等效负磁导率的人工媒质<sup>[2]</sup>之后, 人们逐渐注意到了实现左手材料 (left-handed materials, LHM) 的可能性, 并将所构造出来的左手材料应用于微波领域<sup>[3-13]</sup>.

随后, 开环谐振器作为左手结构的主要实现方式, 得到了进一步的研究和发展, 一些衍生结构如螺旋环结构<sup>[5]</sup> (spiral resonators, SRs)、S 形谐振环<sup>[6]</sup> (S-shaped resonators, SSRs)、V 形谐振环<sup>[7]</sup> (V-shaped resonators, VSRs) 和  $\Omega$  形谐振环<sup>[8]</sup> 等都被相继用于左手材料的构造, 并从理论上和实验上都得到了证明, 但是这些阵列结构复杂庞大, 难以实现小型化, 且由于插入损耗较大而应用不广; Eleftheriades 等则提出以  $L-C$  等效电路模型为基础的传输线法<sup>[9]</sup>, 该模型较先提出的金属谐振模型具有左手频带宽和损耗小等优点, 接着 Caloz 对这一方法进行了系统的理论分析和初步的应用探索, 并首次引入了复合左右手传输线<sup>[10]</sup> (composite right/left-handed transmission line, CRLH TL) 的概

念, Lin 等提出了采用 CRLH TL 来制作任意双频带器件, 比如分支线耦合器和混合环<sup>[11]</sup>, Horii 则利用 PCB 制作工艺实现了一种多层 CRLH TL 结构, 并采用该结构制作了工作频率为 1 GHz 和 2 GHz 的尺寸非常紧凑的双工器<sup>[12]</sup>, Marta Gil 等将 SRR 图案刻蚀在微带地板上, 称之为逆开环谐振器 (complementary split ring resonator, CSRR), 使等效介电常数变为负值, 同时在导带上开槽, 使等效磁导率也变为负值, 这样就构成一种新的 CRLH TL 结构, 用于滤波器设计, 实现了小型化和宽带工作<sup>[13]</sup>.

本文则提出了一种新型双层介质板复合左右手传输线结构, 并分析了其传输特性, 然后将一种新型 Minkowski 分形曲线应用其中, 最后基于该复合结构设计和制作了两款双频滤波器. 该复合左右手传输线不仅实现了小型化, 而且避免了电磁泄漏的问题.

## 2 新型复合左右手传输线

本文提出的新型双层介质板复合左右手传输线结构如图 1 所示, 其中介质 1 使用厚度为 0.4 mm 的 Rogers RT/duroid5880 介质板 (相对

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60971118) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: ltp198808122012@yahoo.cn

介电常数 2.2), 介质 2 使用厚度为 0.9 mm 的微波复合介质 (相对介电常数 6.15), 中间金属环使用厚度 0.036 mm 的铜箔, 环中心与微带线中心重合.

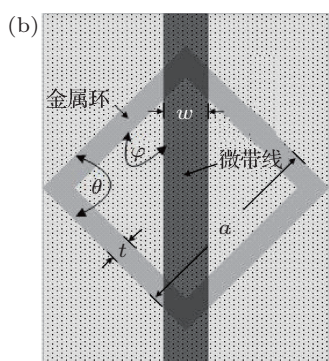
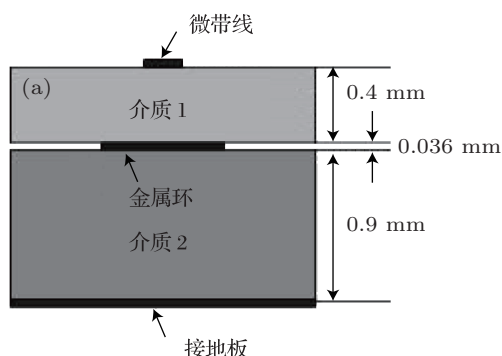


图 1 双层介质板复合左右手传输线 (a) 侧视图; (b) 俯视图

在 Ansoft Designer 中建立几何模型, 进行电磁仿真. 图 2 为新结构  $S$  参数的仿真曲线, 由图可知, 在 3.75 GHz 和 7.48 GHz 附近有两个谐振点. 采用修正的 Nicolson-Ross-Weir 参数提取法将仿真所得  $S$  参数采用软件编程, 可得该结构的等效相对磁导率和等效相对介电常数, 如图 3 所示, 在 3.30—3.85 GHz 和 7.30—7.70 GHz 两个波段实现双负, 说明在这两个波段内, 该结构具有左手材料性质.

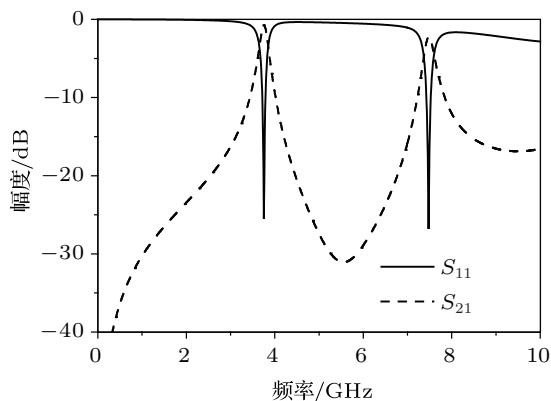


图 2 新结构  $S$  参数仿真图

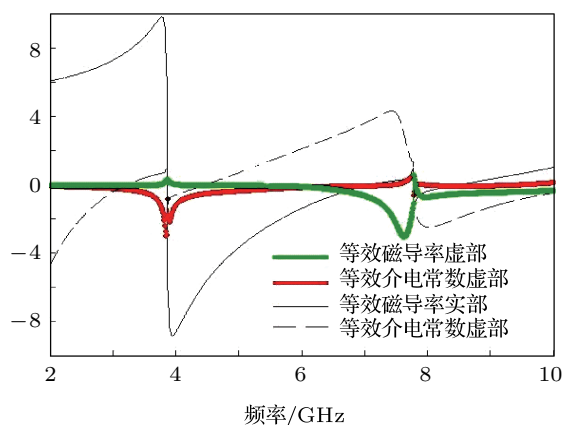


图 3 等效相对磁导率和等效相对介电常数的频率响应曲线

### 3 新结构传输特性与各参数间关系

与新结构有关的主要参数有: 金属环顶角  $\theta$ , 金属环的环宽  $t$ , 方形金属环的边长  $a$ , 上层导带线的宽度  $w$ , 金属环和微带线间的夹角  $\varphi$ . 为研究该双层介质结构的传输特性与各参数尺寸大小间的关系, 通过使用固定其中四个参数值而改变另一个参数值的方法进行电磁仿真来观察频率特性的变化.

首先给定一组参数:  $\theta = 90^\circ$ ,  $t = 1$  mm,  $a = 10$  mm,  $w = 2.8$  mm,  $\varphi = 0^\circ$ .

保持其余参数不变, 依次改变  $\theta$  ( $\theta = 20^\circ, 55^\circ, 90^\circ$ ), 得到新结构的  $S$  参数随  $\theta$  变化的曲线, 如图 4 所示. 新结构在 0 GHz 到 10 GHz 之间有两个谐振点, 随着  $\theta$  的增加, 低端谐振点逐渐向低频移动, 且变化幅度逐渐由大减小; 同时, 随着  $\theta$  的增加, 高端谐振点逐渐向高频移动, 但变化幅度很小. 可见  $\theta$  的变化主要影响低端传输零点.

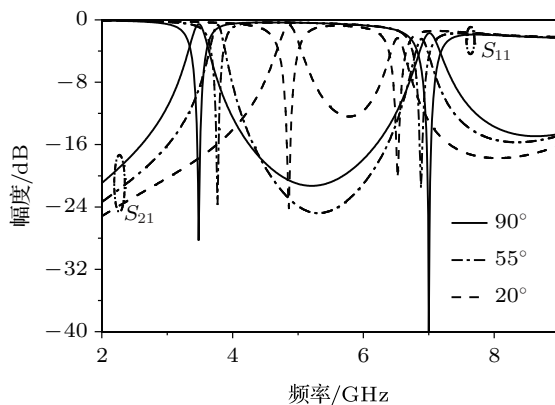


图 4  $\theta$  值变化时对  $S$  参数的影响

保持其余参数不变, 依次改变  $t$  ( $t = 1$  mm,

2 mm, 3 mm), 得到新结构的  $S$  参数随  $t$  变化的曲线. 图 5 所示为金属环的四边  $t$  值同时变化时  $S$  参数的响应曲线, 随着  $t$  值的增加, 低端谐振频点和高端谐振频点同时向高端移动, 且变化幅度大致相同, 而通带宽度随之变宽、选择性变弱. 图 6 所示为改变某单边  $t$  值时  $S_{21}$  参数的响应曲线, 随着  $t$  值增加, 低端谐振频点逐渐分裂出另一谐振点, 原谐振点频率不变, 而新分离出来的谐振点逐渐向高端靠近; 随着  $t$  值增加, 高端谐振点的谐振逐渐向低端移动, 幅度很小, 而插入损耗逐渐变大, 通带逐渐变宽.

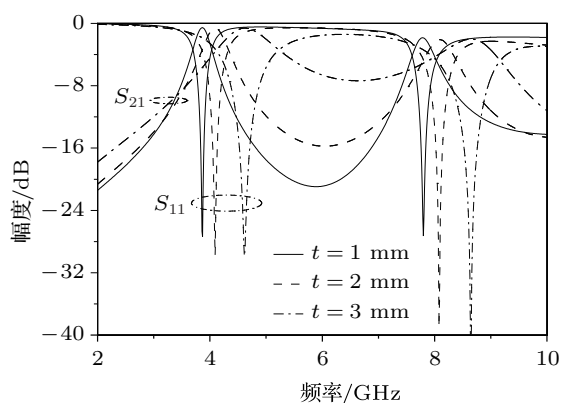


图 5 四边  $t$  值同时变化时对  $S$  参数的影响

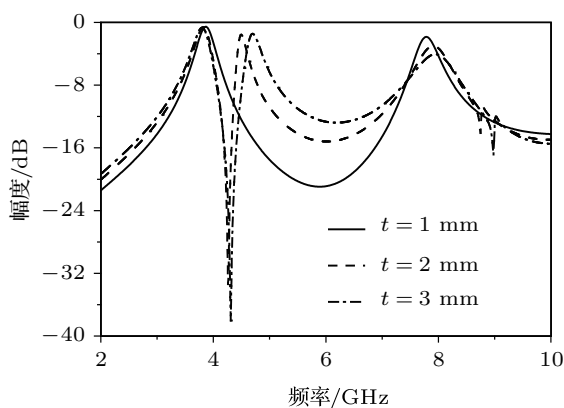


图 6 某单边  $t$  值变化时对参数  $S_{21}$  的影响

保持其余参数不变, 依次改变  $a$  ( $a = 7$  mm, 10 mm, 13 mm), 得到新结构的  $S_{21}$  参数随  $a$  变化的曲线, 如图 7 所示,  $a = 7$  mm 时, 该结构在 10 GHz 以内仅有一个谐振点, 3 dB 通带宽度较宽、选择性较差; 随着  $a$  的增加, 谐振点逐渐演变为两个, 可以猜测, 随着  $a$  的增加谐振点将会更多, 且一次谐振点将逐渐向低频方向移动, 而它们的带宽却会越来越窄.

保持其余参数不变, 依次改变  $w$  ( $w = 1.5$  mm, 3.6 mm, 5.7 mm), 得到新结构的  $S$  参数随  $w$  变化的曲线, 如图 8 所示,  $w$  值的变化对  $S$  参数的主要影响是随着  $w$  的增加低端谐振频点向高端移动、高端谐振频点向低端移动, 但移动幅度均较小, 而随着  $w$  值增加, 谐振点上 3 dB 通带宽度变窄、选择性增强.

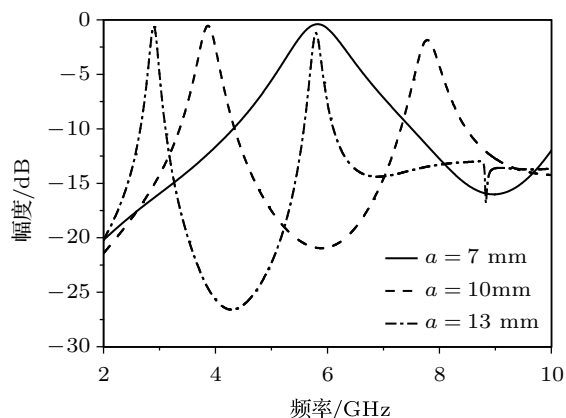


图 7  $a$  值变化时对参数  $S_{21}$  的影响

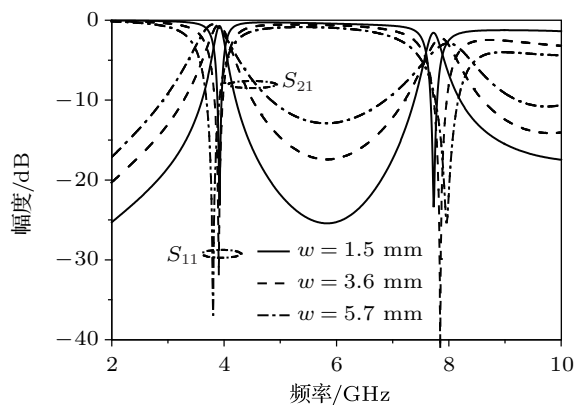


图 8  $w$  值变化时对  $S$  参数的影响

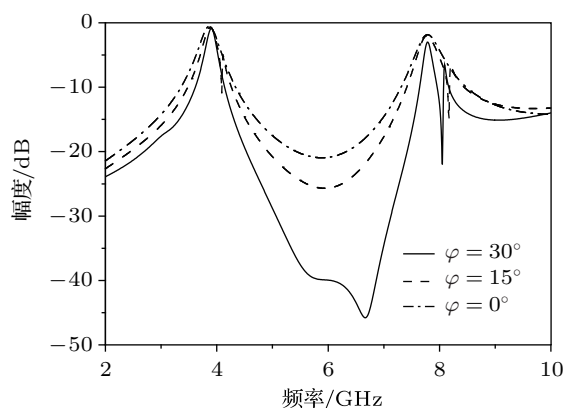


图 9  $\varphi$  值变化时对参数  $S_{21}$  的影响

保持其余参数不变,依次改变  $\varphi$  ( $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ), 得到新结构的  $S$  参数随  $\varphi$  变化的曲线, 如图 9 所示, 随着  $\varphi$  的增加, 两个谐振点的选择性都随之加强, 而谐振频率并没有随之改变, 同时, 高端谐振点内的通带插入损耗有所增加, 但是增加幅度很小. 另外, 需要指出的是, 随着  $\varphi$  的减小 ( $\varphi$  小于  $45^\circ$  时成立, 因为金属环结构是中心对称的), 所提出的新结构的单元尺寸随之减小.

#### 4 基于 Minkowski 分形谐振环双频带滤波器设计

在目前的微波系统及无线通信系统中, 很多仪器设备都设计工作在两个频段的, 如 GPRS 系统、GPS 卫星系统, 这时就需要采用双频带滤波器滤波以减少系统中的元器件数目, 减少设计空间, 降低功耗; 而如果数据分散在一些窄频带内进行传输, 则此时更需要双频带滤波器, 因为相对于宽带滤波器, 双频带滤波器在抑制带外干扰上具有很明显的优势. 因此, 对双频带滤波器的研究和设计很有意义.

一般来说, 具有分形结构的物体都有比例自相似性和空间填充性这两大特点, 因此, 如果把分形的这两大特点应用到滤波器设计上, 能够达到有效抑制滤波器的高次谐波、产生传输零点、使滤波器结构更加紧凑等效果, 从而促进滤波器的性能提高和尺寸小型化.

本文采用了新型 Minkowski 环, 其构造过程表述如下: 取一条长为 1 的直线段, 如图 10 中  $n=0$  所示; 然后将其按比例 3:2:3 三分, 保留两端线段为  $3/8$  不动, 将中间的一段改换成高为  $1/4$ 、底也为  $1/4$  的 U 形折线, 如图 10 中  $n=1$  的操作; 最后将五条线段分别按并比例 3:2:3 三分, 将直线段中间的一段改换成相应线段自身比例的  $1/4$  的 U 形折线, 如图 10 中  $n=2$  的操作. 重复上述操作至无穷, 可得到新型 Minkowski 曲线. 考虑到加工精度只能达到  $0.1\text{ mm}$ , 本文只分析了零次分形、一次分形和二次分形.

将所提出的新型双层介质板复合左右手传输线中的谐振环使用上述 Minkowski 分形方法分形, 可得新型谐振环. 基于上述研究和讨论结果, 设计并制作了两款基于 Minkowski 分形谐振环双频带

滤波器, 分别为一单元结构双频带滤波器和两单元结构双频带滤波器. 在两单元级联结构设计时, 为拓展该单元结构的通带带宽, 在微带线上对称的加载阶梯形开路枝节以增强金属环与微带线之间的耦合, 从而改善其通带特性. 其实物部件图如图 11 和图 12 所示, 图中所示为组成滤波器的上下两个介质板, 制作滤波器时需要将它们无缝地焊接在一起.

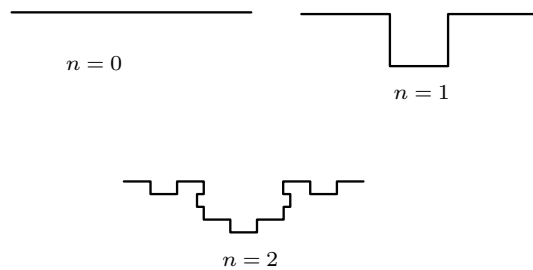


图 10 Minkowski 曲线生成示意图



图 11 一单元结构双频带滤波器部件图

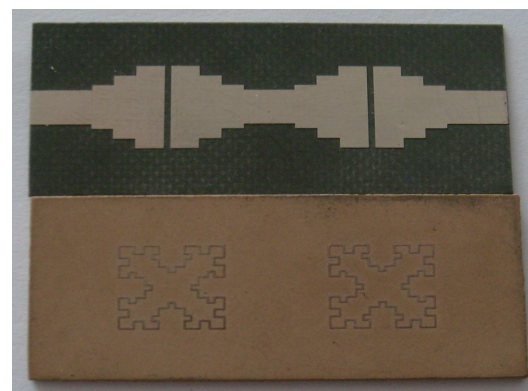


图 12 两单元结构双频带滤波器部件图

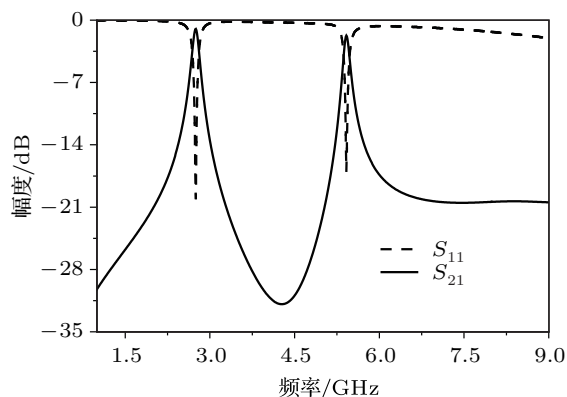


图 13 基于一级单元 Minkowski 分形谐振环双频带滤波器

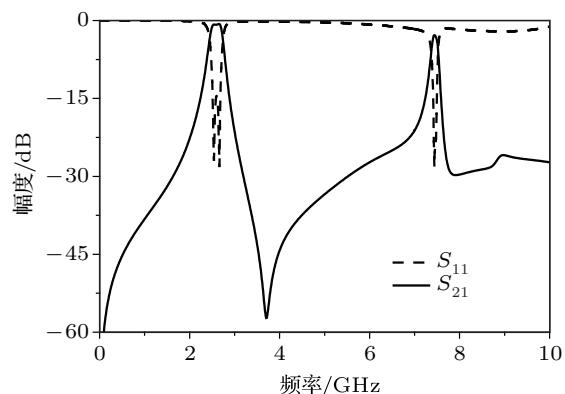


图 14 基于二级单元 Minkowski 分形谐振环双频带滤波器

图 13 和图 14 分别给出了两个滤波器的  $S$  参数的实测结果. 由图 13 和图 14 可知, 基于单环结构的双频滤波器两个通带中心频率分别为 2.75 GHz 和 5.42 GHz, 基于双环结构的双频滤波器两个通带中心频率分别为 2.60 GHz 和 7.45 GHz. 通带内回波损耗均低于 15 dB, 带外抑制良好, 选择特性均大

于 40 dB/GHz. 这种制作方式不会因为接地板的缺陷而造成电磁波泄漏, 对器件的电磁兼容性设计大有帮助. 与文献 [14] 中所提出的两单元结构双层介质滤波器相比, 本文设计的两单元结构滤波器尺寸缩小了 35%.

- [1] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Young I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J 1999 *IEEE Trans. MTT* **47** 2075
- [3] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Wu X 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1852 (in Chinese) [王甲富, 屈绍波, 徐卓, 张介秋, 马华, 杨一鸣, 吴翔 2010 物理学报 **59** 1852]
- [4] Li H Y, Zhang Y W, Wang P C, Li G Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6480 (in Chinese) [李海洋, 张治文, 王蓬春, 李贵泉 2007 物理学报 **56** 6480]
- [5] Baena J D, Marques R, Medina F 2004 *Phys. Rev. B* **69** 014402
- [6] Chen H, Ran L, Huangfu J 2004 *Phys. Rev. E* **70** 057605
- [7] Wu B I, Wang W, Pacheco J 2005 *Prog. Electromagn. Res.* **51** 295
- [8] Ran L, Huangfu J, Chen H 2004 *Phys. Rev. B* **70** 73102
- [9] Eleftheriades V, Iyer A K, Kremer P C 2002 *IEEE Trans. MTT* **50** 2702
- [10] Caloz C, Itoh T 2004 *IEEE Trans. AP* **52** 1159
- [11] Lin I Hsiang, De Vincentis M, Christophe Caloz 2004 *IEEE Trans. MTT* **52** 1142
- [12] Horii Y, Christophe Caloz, Tatsuo Itoh 2005 *IEEE Trans. MTT* **53** 1527
- [13] Marta Gil, Jordi Bonache, Joan Garc'ia-Garc'ia 2007 *IEEE Trans. MTT* **53** 1296
- [14] Wang S, Guo M S, Chan W 2007 *Microwave and Opt. Tech. Lett.* **49** 2726

# Novel composite right/left-handed transmission line and its application to filter design\*

Li Tian-Peng<sup>†</sup> Wang Guang-Ming Liang Jian-Gang Zhang Chen-Xin

(Missile Institute, Engineering University, Sanyuan 713800, China)

(Received 10 January 2012; revised manuscript received 9 April 2012)

## Abstract

Split ring resonator arrays are difficult to achieve miniaturization because of their big sizes, while complementary split ring resonators are easy to damage the other parts of the microwave circuit because it is etched on the ground layer. In order to solve these problems, a novel double-layer dielectric composite right/left-handed transmission line structure is proposed and its equivalent relative permittivity and permeability are calculated. Then the influence of dimension parameters of this novel structure on transmission characteristics is analyzed. Finally two dual-band bandpass filters are designed and fabricated by applying a new Minkowski fractal curve to this structure, and meanwhile the dual-band characteristic of this composite right/left transmission line is demonstrated.

**Keywords:** CRHL TL, Minkowski fractal curve, dual-band bandpass filter

**PACS:** 42.25.Bs, 78.70.-g

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60971118).

<sup>†</sup> E-mail: ltp198808122012@yahoo.cn